

ТЕМПЕРАТУРНА ТА ШВИДКІСНА ЧУТЛИВІСТЬ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ В ПЕРСПЕКТИВНИХ СПЛАВАХ TNM

д.т.н., проф. завідувач відділом фазових перетворень **Подрезов Ю. М.¹**,
м.н.с. відділу фазових перетворень **Ремез М. В.²**,
к.т.н., доц., доцент кафедри фізики металів **Холявко В. В.³**,
магістрант кафедри фізики металів **Прокопчук М. Д.⁴**

^{1, 2} Україна, м. Київ, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України,
^{3, 4} Україна, м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»

DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30112019/6763

ARTICLE INFO

Received: 16 September 2019
Accepted: 20 November 2019
Published: 30 November 2019

KEYWORDS

TiAl-based alloys; TNM alloys;
temperature and velocity sensitivity;
mechanical properties; lamella
structure; tensile test; bending test.

ABSTRACT

The temperature and velocity sensitivity of the mechanical properties of TiAl-based alloys were investigated. The structure was determined by scanning electron microscopy in SEI mode. Mechanical properties were determined by the results of tensile and bending tests. It was found that the temperature and velocity dependence of the mechanical properties in alloys with 47% Al is practically absent. This makes them promising for use as structural materials, due to the stability of their properties.

Citation: Подрезов Ю. М., Ремез М. В., Холявко В. В., Прокопчук М. Д. (2019) Temperaturna ta Shvydkisna Chutlyvist Mekhanichnykh Vlastyvostei v Perspektivnykh Splavakh TNM. *World Science*. 11(51), Vol.1. doi: 10.31435/rsglobal_ws/30112019/6763

Copyright: © 2019 Подрезов Ю. М., Ремез М. В., Холявко В. В., Прокопчук М. Д. This is an open-access article distributed under the terms of the **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Вступ. Основною проблематикою досліджень властивостей сучасних TNM сплавів є оптимізація механічних характеристик з метою широкого та довготривалого застосування сплавів в діапазоні температур від кімнатної до робочих (600 °C – 800 °C). Ідеологія розробки таких сплавів полягає в створенні литої структури, яка за рахунок оптимальних режимів термообробки дозволяє отримати структуру з необхідним співвідношенням між кількістю γ -, α_2 - та β -фаз. Відомо, що створення ($\gamma + \alpha_2$) ламельної структури, веде до збільшення рівня механічних характеристик в сплавах на основі γ -TiAl. В даній структурі тонкі прошарки α_2 -Ti₃Al фази перешкоджають поширенню тріщин, зароджених в γ -TiAl фазі, збільшуючи низькотемпературну пластичність і тріщиностійкість. В свою чергу, фаза γ -TiAl забезпечує працездатність сплавів при більших навантаженнях і температурах порядку 600 °C – 800 °C [1].

Інтенсивні роботи які були проведені стосовно груп високотемпературних матеріалів протягом останніх двадцяти років, використовуючи сучасні експериментальні методи та теоретичні напрацювання, привели до розвитку концепції нового, так званого 3^{го}, покоління титан-алюмінідних сплавів, легованих β стабілізаторами. Значний відсоток β фази в цих сплавах позитивно впливає на кінетику кристалізації та їх високотемпературну поведінку [2]. В цих сплавах в якості β стабілізаторів використовують Nb та Mo. В роботі [3] в якості базової композиції використовується Ti – 43.5Al – 4Nb – 1Mo – 0.1B (at. %). Також в роботах [3, 4] зазначається, що сплави з вмістом алюмінію на рівні 44 at. % мають більші можливості оптимізації структури за рахунок термічної та термомеханічної обробки.

Як було з'ясовано в попередніх дослідженнях [5], сплави з 44 % та 48 % Al мають найбільш відповідний до умов експлуатації комплекс механічних характеристик. Тому **метою даної роботи** було встановлення температурної та швидкісної чутливості механічних характеристик перспективних сплавів з 44 % та 47 % Al.

Матеріали та методика досліджень

Вивчалася механічна поведінка двох груп відпалених сплавів системи Ti-Al. У роботі Sun, F. S. [6] були проведені дослідження щодо впливу легуючих елементів на тип структури титан-алюмінідних сплавів, та була виведена формула згідно якої можна визначити максимальний вміст легуючих елементів.

Таким чином були обрані сплави наступного складу: $\text{Ti}_{47,4}\text{Al}_{47}\text{Nb}_4\text{Cr}_{0,5}\text{Mo}_1\text{B}_{0,1}$ (№ 3); $\text{Ti}_{47,5}\text{Al}_{47}\text{Nb}_4\text{Cr}_{0,5}\text{Mo}_1$ (№ 6); $\text{Ti}_{50,9}\text{Al}_{44}\text{Nb}_{3,5}\text{Cr}_{0,5}\text{Mo}_1\text{B}_{0,1}$ (№ 9); $\text{Ti}_{50,4}\text{Al}_{44}\text{Nb}_{4,5}\text{Mo}_1\text{B}_{0,1}$ (№ 10).

Термообробка була проведена виходячи з існуючих поглядів стосовно структуроутворення [3], за температури 950 °C з відносно швидким охолодженням (контейнер зі зразком після відпалу евакуювався за зону нагрівання).

Механічні властивості сплавів досліджувалися за результатами випробувань на розтяг та трьох точковий згин. Трьохточковий згин проводився на випробувальній машині TermoTEST. Зразки для випробувань на згин мали розміри $h=2$ мм, $b=3$ мм. Довжина зразка складала 50 мм, щоб, з одного боку, вільно розташовуватись в комірках транспортера (52 мм), а з іншого – безпечно вкладатись на опорні ролики з відстанню між ними $L=40$ мм. Експерименти проводили за швидкості переміщення траверси ~ 1 мм/хв. Оскільки жорсткість машини значно перевищує жорсткість зразка, давач переміщення не використовувався. В експериментах на стиск зразки для механічних випробувань мали форму циліндра з діаметром $\varnothing 3$ мм і довжиною робочої частини $l_0=15$ мм.

Протягом обробки первинних даних, використовувалася запропонована роботі [7] методологія перерахунку кривих навантаження при згині за формулами, що зазвичай використовуються для розрахунку пружної частини кривої навантаження в процесі розтягування (з урахуванням великого внеску пружної складової при відносно малих ступенях деформації).

Експерименти на розтяг виконувалися згідно стандарту ДСТУ EN 10002 – 1:2006, на машині 1246-2300/2 конструкції НИКИМП. Видовження фіксувалося тензометричним датчиком безпосередньо з робочої частини зразка. Конструкція тензометра дозволяла вимірювати деформацію зразка при кімнатній та підвищених температурах з чутливістю за деформацією не гірше $2 \cdot 10^{-5}$ та вимірювати модуль пружності з похибкою не більше 2 %. Високотемпературні випробування проводили в вакуумі.

Структуру сплавів досліджували зі шліфів, методом скануючої електронної мікроскопії на приладі JEOL SuperProbe 8200.

Результати експериментів та їх обговорення.

На рис. 1 представлені результати скануючої електронної мікроскопії в режимі SEI зі збільшенням в 1000х де більш важка фаза зазвичай виглядає більш світлою. На знімках можна побачити β_0 фазу білого кольору, α_2 фазу сірого та γ фазу темно-сірого кольору. Зерна складаються з ламілярних ($\alpha_2+\gamma$) колоній, та β_0 фази яка розташовується по границях зерен. Ламельна структура утворилася під час розпаду високотемпературних фаз β та α . Вище описана структура відповідає структурі сплавів, описаних в роботах [3, 8], і як наслідок, від досліджуваного матеріалу можна очікувати аналогічного рівня механічних властивостей.

Вплив температури на характер кривих деформаційного зміцнення сплаву з 44 % Al випробуваного на трьохточковий згин наведено на рис. 2.

З отриманих даних видно, що матеріал з малим вмістом алюмінію демонструє наявність температурної чутливості кривих зміцнення. Зі збільшенням температури зростає деформація до руйнування від $\epsilon=0,001$ до $\epsilon=0,025$.

Аналогічні дослідження, проведені на сплав з 47 % Al, продемонстрували інший характер температурної залежності кривих зміцнення. Відповідні результати наведено на рис. 3.

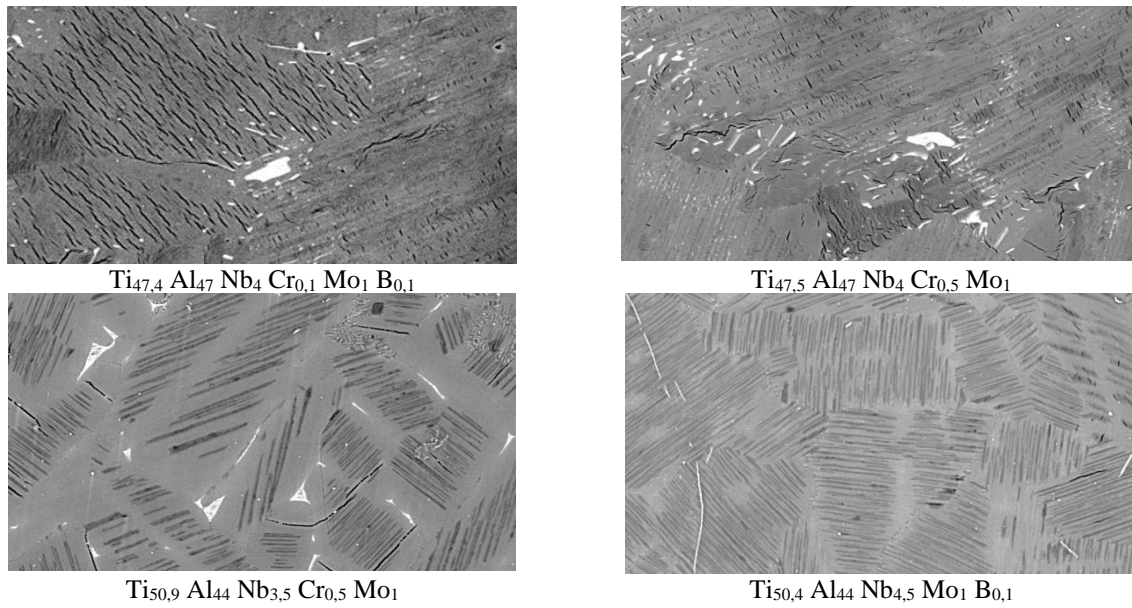


Рис. 1. Результати растрової електронної мікроскопії сплавів

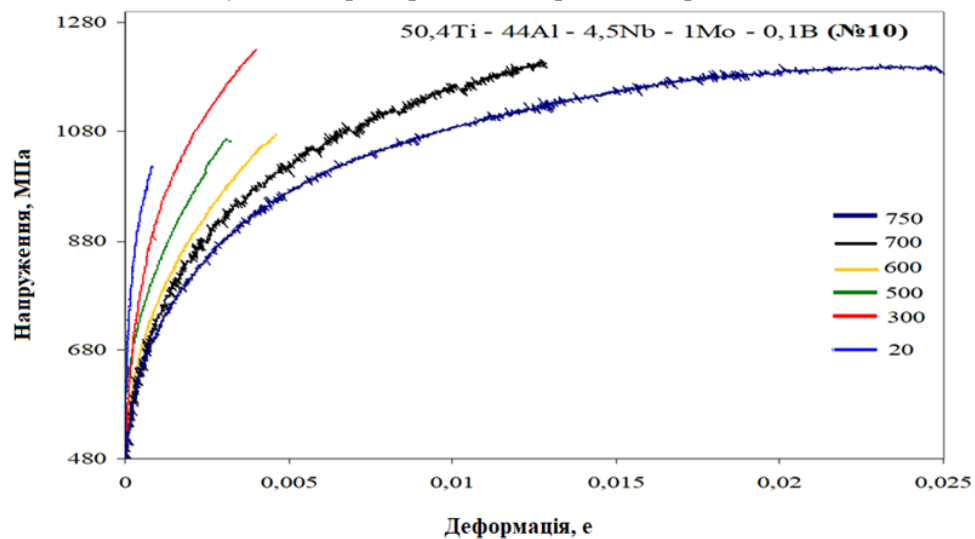


Рис.2. Залежність напруження від деформації для сплаву з 44% Al в діапазоні температур від 20°C до 750°C

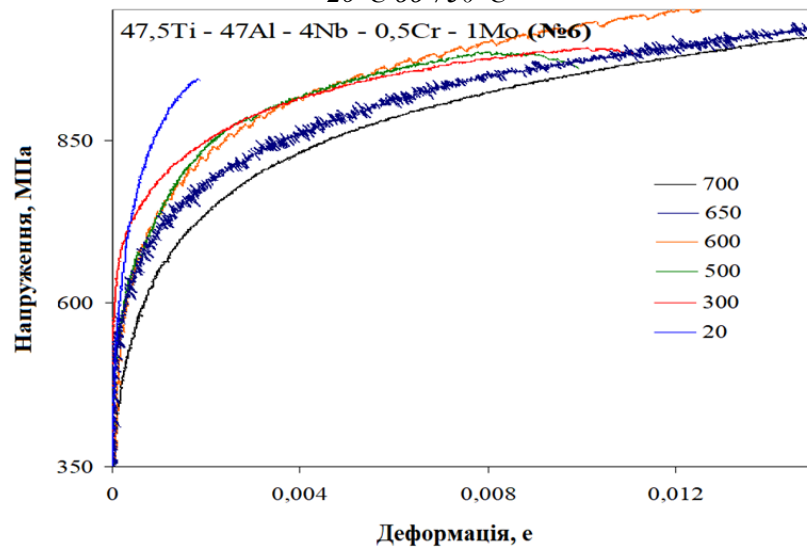


Рис.3. Залежність напруження від деформації для сплаву з 47% Al в діапазоні температур від 20°C до 750°C

Результати випробувань на розтяг за різних температур наведено на рис. 4. Вони свідчать про те, що для сплавів з 47 % Al температурна чутливість більш слабка ніж у сплавів з 44 % Al, і при підвищених температурах найбільше зміцнення демонструють зразки, випробувані в діапазоні температур 600 °С - 650 °С. При цьому, пластичність сплавів цього складу в усьому діапазоні температур практично втричі вища ніж в сплавах з 44 % Al. Для обох типів сплавів в області температур 700 °С – 800 °С спостерігається різке зростання пластичності (рис. 4 а).

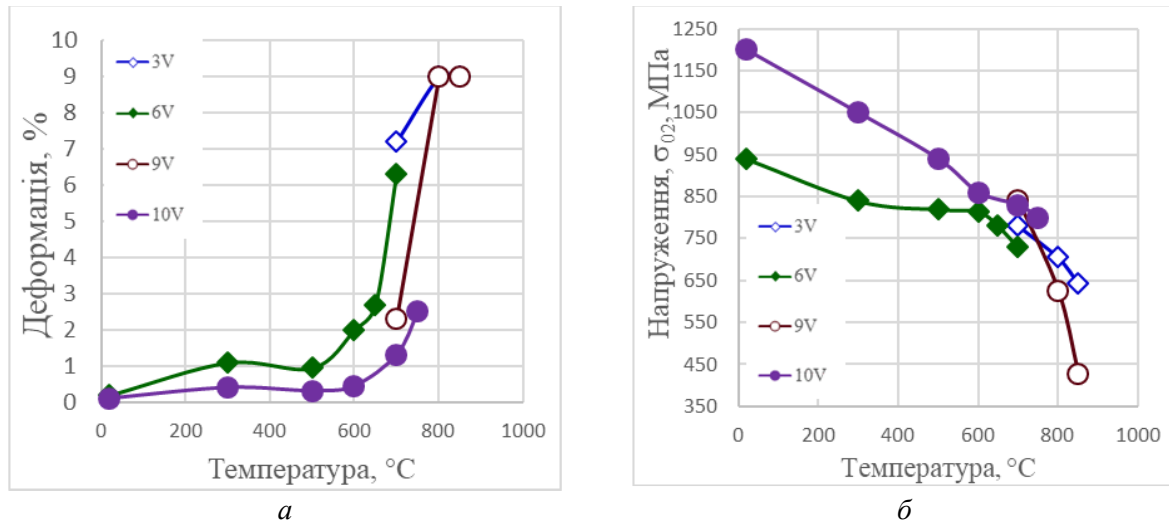


Рис. 4. Залежність механічних характеристик від температури: а-пластична деформація (швидкість навантаження $3 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$), б – напруження границі плинності

Згідно теорії міцності, таке підвищення пластичності з ростом температури характеризує наявність так званого в'язко-крихкого переходу, відомого з роботи Трефілова для ОЦК металів [9]. Важливо, що діапазон в'язко-крихкого переходу відповідає робочим температурам за яких працюють вироби з титан-алюмінідних сплавів. З графіку видно, що в сплавах з 44 % Al цей перехід відбувається приблизно на 50°C вище. Також слід зазначити, що в усіх структурних станах параметри міцності залишаються достатньо високими в усьому дослідженому діапазоні температур (рис. 4 б).

Слід звернути увагу на дещо незвичайну чутливість пластичності інтерметалідів цього класу до зміни швидкості деформування в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу. На рис. 5 наведено температурні залежності пластичності сплавів з 44% та 47% Al, випробуваних за швидкостей навантаження $3 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ та $3 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$.

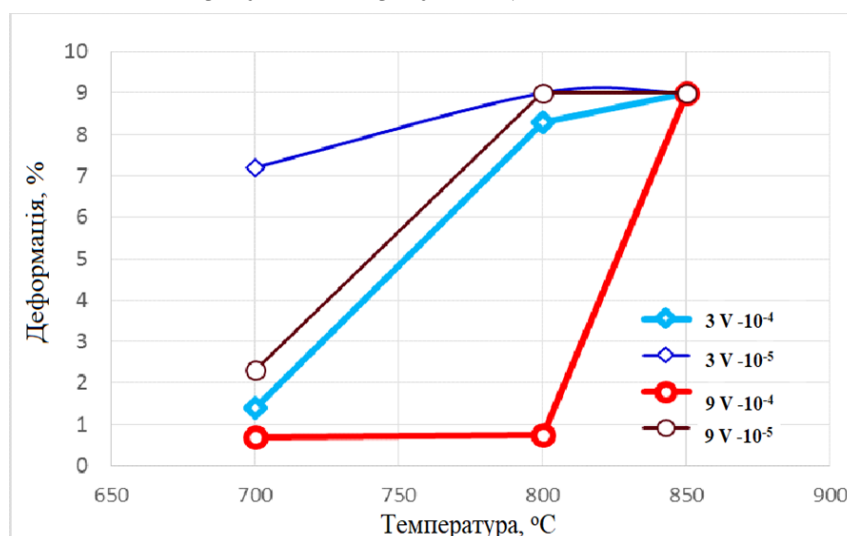


Рис. 5. Температурна залежність деформації при швидкостях деформування $3 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ та $3 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$

З отриманих даних видно, що для обох сплавів, випробуваних за температури в'язко-крихкого переходу $T_{\text{вк}}$ зменшення швидкості деформування на один порядок величини веде майже

до 5 разового зростання пластичності. Таке підвищення пластичності потребує значного підвищення температури (до 100 °C). За обох швидкостей випробувань, температура в'язко-крихкого переходу в сплавах з 44% Al, знаходиться на 50°C – 100°C вище, ніж в сплавах з 47% Al.

Слід зауважити що в області в'язко-крихкого переходу зміна швидкості навантаження слабо впливає на характер кривої зміцнення. З рис. 6 видно, що в сплаві з 44% Al випробуваного за 650°C, зміна швидкості деформування з $3 \cdot 10^{-4}$ сек⁻¹ на $3 \cdot 10^{-5}$ сек⁻¹ практично не впливає на деформаційне напруження вздовж всієї кривої навантаження. У сплаві з 44% Al випробуваного за 700°C початкова ділянка діаграм зміцнення співпадає і, починаючи з деформації 0,6 %, зміцнення в матеріалі деформованому за менших швидкостях, виявляється дещо нижчим.

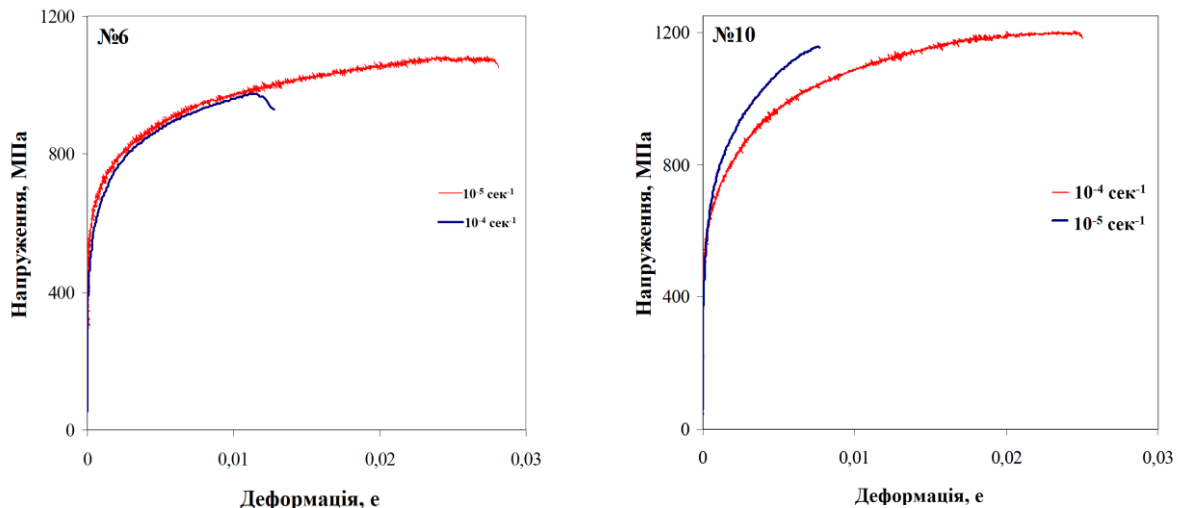


Рис. 6. Залежність напруження від деформації при швидкостях деформування $3 \cdot 10^{-4}$ сек⁻¹ та $3 \cdot 10^{-5}$ сек⁻¹

Наведені на рис. 6 криві навантаження дозволяють порівняти закономірності зміцнення зразків, випробуваних за температури в'язко-крихкого переходу з різними швидкостями деформування. Найнижчу температуру в'язко-крихкого переходу $T_{\text{вх}} = 650$ °C демонструє сплав № 6 з 47% Al. Характерна особливість кривих зміцнення цього сплаву (рис. 6) полягає в тому, що криві, які отримані за різних швидкостей повністю співпадають, але деформація до моменту руйнування суттєво відрізняється (від 1,2 % за швидкості $3 \cdot 10^{-4}$ сек⁻¹ до 2,8 % за швидкості $3 \cdot 10^{-5}$ сек⁻¹). Сплав №3 з таким самим вмістом алюмінію демонструє схожу поведінку. Деформація до руйнування збільшується з 1,7 % до 8 %.

Фізична природа цих ефектів пов'язана з особливостями протікання термоактиваційних процесів в області в'язко-крихкого переходу. Зокрема, різке підвищення пластичності зі зміною швидкості деформування можна пояснити релаксацийними процесами в голові двійникового скучення, які, в разі збільшення часу деформування, встигають зменшити концентрацію напружень і перешкоджають виникненню тріщин. Зменшення напруження при збільшенні деформації за малих швидкостях навантаження, можна пояснити додатковими деформаційними дефектами які впливають на протікання термоактиваційних процесів [1].

Отримані результати важливі з практичної точки зору, оскільки вони показують, що в області робочих температур зменшення швидкості деформування мало впливає на достатньо великі значення деформівних напружень, що безумовно сприяє довготривалій роботі виробів за цих температур. Крім того, протікання релаксацийних процесів протягом довготривалої роботи виробів з досліджуваного матеріалу веде до значного збільшення пластичності матеріалів, але при цьому слід мати на увазі, що за нестационарних умов навантаження, які супроводжуються стрибками напруження, може відбуватися окрихчення елементів конструкцій матеріалу.

Висновки. Таким чином, в області температури в'язко-крихкого переходу тільки сплав з 47% Al до моменту руйнування демонструє відсутність чутливості кривої зміцнення до швидкості деформування. В усіх інших випадках при перевищенні деякої критичної деформації, криві зміцнення проявляють чутливість до ступеню деформації. Також разом із цим, сплав з 47% Al майже не проявляє температурної чутливості, крім кімнатної температури, що робить його більш стабільним для використання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Appel F., Oehring M., Wagner R. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys // *Intermetallics*. – 2000. – 8. – P. 1283–1312. 2
2. Zhang D. Effect of heat-treatments and hot-isostatic pressing on phase transformation and microstructure in a beta/B2 containing gamma-TiAl based alloy / D. Zhang, G. Dehm, H. Clemens // *Scr. Mater.* 2000. – Vol.42. – P. 1065.
3. Intermetallic β -solidifying γ -TiAl based alloys – from fundamental research to application / S. Mayer, P. Erdelyi, F.D. Fischer et al. // *Adv. Materials*. – 2017. – 9. – P. 1–27.
4. Clemens H. Design, Processing, Microstructure, Properties and Applications of Advanced Intermetallic TiAl Alloys / H. Clemens, S. Mayer // *Adv. Eng. Mater.* – 2013. – Vol. 15. – P. 191–215.
5. Прокопчук М. Д. механічні властивості сплавів на основі легованого Мо алюмініду титану/ М.Д. Прокопчук, В. В Холявко // Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів – XI міжнар. конф студентів, аспірантів та молодих вчених. Збірка тез доповідей. 19–20 квітня 2018 р., Київ, Україна – К. «КПІ імені Ігоря Сікорського». – С. 141–143.
6. Sun F.-S. Alloying mechanism of β stabilizers in a TiAl alloy / F. S. Sun, C.-X. Cao, S.-E. Kimet // *Metall. Mater. Trans. A*. – 2001. – Vol. 32A. – P. 1573–1589.
7. Подрезов Ю.М. и др. Экспрес метод прогнозування довготривалої міцності та опору повзучості в високотемпературних сплавах на основі титану / Ю.М. Подрезов, Д. Г. Вербило, В. І. Даниленко, Н. І. Циганенко, Б. В. Шуригін // *Електронна мікроскопія і міцність матеріалів*. 2018. – 24. – Київ : ІПМ ім.І.М.Францевича НАН України. – С. 35–46.
8. Подрезов Ю. М., Бондар. А. А., Вітусевич В. Т., Ремез М. В. та ін. Структура та властивості титан-алюмінідних сплавів, легованих ніобієм і танталом // *Порошковая металлургия*. – 2011. – № 7/8. – С. 25–46.
9. Трефилов В.И. Физические основы прочности тугоплавких металлов / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, С. А. Фирстов. – Киев: Наукова думка, 1975. – 315 с.